

<https://doi.org/10.25686/foreco.2024.53.76.009>

УДК 528.88

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ПОСТАГРОГЕННЫХ ЗЕМЛЯХ ЮГА СРЕДНЕРУССКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Э.А. Терехин

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Лесная растительность распространяется на постагрогенных землях юга Среднерусской возвышенности в разных формах. В регионе представлены залежи с отсутствием лесной растительности, наличием редких или частых одиночных деревьев, с участками сплошного лесного покрова. В статье изложены результаты сравнительного анализа влияния форм присутствия древесной растительности на постагрогенных землях на их спектрально-отражательные характеристики по данным Landsat-8 OLI и Sentinel-2 MSI. Исследование проведено для четырех типов постагрогенных земель: с отсутствием лесной растительности, с редкими одиночными деревьями, с частыми отдельно стоящими деревьями, с участками сплошного лесного покрова. В перечисленном ряду наблюдается общая закономерность снижения отражательных характеристик в видимом и коротковолновом инфракрасном диапазонах и увеличения отражательной способности в ближней инфракрасной области. При этом статистически значимые изменения в отражательной способности начинают наблюдаться только после появления на постагрогенных землях участков сплошного лесного покрова. Статистически значимых различий по спектрально-отражательным характеристикам, измеренным по данным с обоих спутниковых сенсоров, между постагрогенными землями с разной формой присутствия одиночной древесной растительности не выявлено. Для спектрально-отражательных характеристик ближнего инфракрасного диапазона, измеренных по данным Landsat-8 OLI либо Sentinel-2 MSI, установлена общая закономерность снижения вариабельности в изученном ряду постагрогенных земель вследствие увеличения доли лесной растительности на угодьях. Устойчивого влияния любых форм присутствия одиночной древесной растительности на спектрально-отражательные характеристики постагрогенных земель, изученных по обоим типам спутниковых данных, не установлено.

Ключевые слова: постагрогенные земли, лесная растительность, кривая спектральной яркости, вариация спектрально-отражательных характеристик, Landsat-8 OLI, Sentinel-2 MSI

APPLICATION OF DIFFERENT REMOTE SENSING DATA TYPES FOR THE ANALYSIS OF FOREST VEGETATION DISTRIBUTION ON POSTAGROGENIC LANDS IN THE SOUTH OF THE CENTRAL RUSSIAN UPLAND

E.A. Terekhin

Belgorod State National Research University

Forest vegetation spreads across the postagrogenic lands in the south of the Central Russian Upland in various forms. The region includes abandoned agricultural lands with no forest vegetation, the presence of rare or frequent scattered trees, and areas of continuous forest cover. The article analyzes the influence of the forest

vegetation presence forms on postagrogenic lands on their spectral reflectance derived from Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI data. The study was performed for four types of postagrogenic lands: with no forest vegetation, with rare single trees, with frequent isolated trees, and with areas of continuous forest cover. In the listed series of lands, a general pattern of decreasing visible and short-wave infrared reflectance and increasing near-infrared reflectance is observed. At the same time, statistically significant changes in reflectance start only after the appearance of areas of continuous forest cover on postagrogenic lands. No statistically significant differences in reflectance measured using both remote sensing data types were found between postagrogenic lands with different forms of scattered forest vegetation presence. For near-infrared reflectance measured using Landsat-8 OLI or Sentinel-2 MSI data, a general pattern was established associated with a decrease in variability in the studied series of postagrogenic lands due to an increase in the presence of forest vegetation on the lands. No stable influence of the scattered trees presence on postagrogenic lands reflectance studied using both types of satellite data has been established.

Key words: *postagrogenic lands, forest vegetation, spectral reflectance curve, spectral reflectance variation, Landsat-8 OLI, Sentinel-2 MSI*

Введение

Восстановительные сукцессии, протекающие на постагрогенных землях, обуславливают изменение комплекса характеристик растительного и почвенного покровов (Голеусов, Лисецкий, 2009), в связи с чем их анализ играет ключевую роль в ландшафтных исследованиях. Восстановление лесной растительности, протекающее на многих угодьях в условиях прекращения распашки, оказывает влияние на потоки вещества и энергии. Его анализ необходим для получения объективных представлений о развитии экосистем (Кудрявцев, 2007; Широких и др., 2023) и планирования дальнейшего использования земель (Иванов и др., 2020; Бурлуцкий и др., 2021; Fayet et al., 2022). В начале XXI века процессы естественного облесения получили распространение в естественных и постагрогенных ландшафтах лесной (Курбанов и др., 2010; Королева и др., 2018; Данилов и др., 2023) и лесостепной (Терехин, 2021) природных зон европейской территории России и за рубежом (Bowen et al., 2007; Nordén et al., 2021).

Процессы формирования сообществ древесной растительности широко распространены и в ландшафтах юга Среднерусской возвышенности (Терехин, Чендев, 2018). На его территории, расположенной преимущественно в условиях подзоны типичной лесостепи и характеризующейся преобладанием агроландшафтов (Трофимов и др., 2017), сообщества древесной растительности на постагрогенных землях распространяются в разных формах. Представлены угодья с редкими одиночными деревьями, достаточно частыми деревьями, но не формирующими сомкнутой древесной растительности, с участками сплошного лесного покрова. Одновременно имеются постагрогенные земли, на которых древесная растительность может практически полностью отсутствовать.

Перспективным направлением исследования пространственных особенностей в распространении постагрогенных земель и их состоянии, связанном с изменениями растительного покрова, выступает анализ влияния его характеристик на спектрально-отражательные свойства. Связь характеристик растительности постагрогенных земель и их отражательных свойств выступает основой для выявления и анализа участков бывшей пашни (Yin et al., 2018; Лежнин, 2020; Yoon et al., 2020). Развитие этого направления во многом связано с накоплением в последние десятилетия многозональных данных Landsat-8 OLI и

Sentinel-2 MSI, которые позволяют с высокой радиометрической точностью оценивать спектрально-отражательные характеристики отдельных угодий (Dong et al., 2020; Tran et al., 2022; Castaldi et al., 2023). Установление закономерностей влияния форм присутствия (участия) лесной растительности на их спектрально-отражательные характеристики выступает необходимым условием развития подходов к анализу сукцессий на постагрогенных землях с применением данных дистанционного зондирования Земли. Вместе с тем становится необходимой задачей исследование возможностей различных типов спутниковых снимков для анализа распространения лесной растительности.

Цель исследования заключалась в оценке влияния форм распространения древесной растительности, присутствующей на постагрогенных землях юга Среднерусской возвышенности, на их спектрально-отражательные характеристики, измеряемые по спутниковым данным Landsat OLI и Sentinel-2 MSI. Задачи исследования включали сравнение спектрально-отражательных характеристик различных типов постагрогенных земель и анализ их кривых спектральной яркости.

Область исследования

Территория исследования охватывала юг Среднерусской возвышенности, преимущественно в пределах Белгородской области. Объектами исследования выступали постагрогенные земли, типичные для региона.

Материалы и методика исследования

Выборка постагрогенных земель сформирована таким образом, чтобы учитывать особенности наиболее распространенных форм присутствия лесной растительности. В исследовании выделено 4 типа таких земель: с отсутствием древесной растительности, с редкими одиночными деревьями, с частыми одиночными деревьями и расстоянием не менее 9-10 м между ними, с участками сплошного лесного покрова. Подбор объектов для исследования осуществлен методом комплексного анализа: снимков Sentinel-2 летнего периода 2022 года, разновременных снимков Landsat TM/OLI за 2005-2022 годы, снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных из интернет-сервисов открытого доступа, материалов наземных наблюдений. Объекты исследования подбирались таким образом, чтобы на них были представлены только лиственные породы деревьев, что было необходимо для корректного сравнения спектрально-отражательных характеристик постагрогенных земель.

Каждый тип постагрогенных земель исследован на тестовых участках в ходе полевых наблюдений. Общая выборка включала более 100 объектов. Для каждого из них были определены фактические особенности присутствия древесной растительности по состоянию на 2021-2023 годы. Спектрально-отражательные характеристики по данным Sentinel-2 изучены на основе снимков августа 2022 года, расположенных в тайлах T37UCS, T37UDS и T37UDR. Снимки прошли атмосферную и радиометрическую коррекцию и были пересчитаны в уровень L2A с использованием программы SNAP (модуль Sen2Cor). Спектрально-отражательные характеристики по данным Landsat-8 OLI исследованы на основе снимков августа 2021 года, расположенных в ячейках системы WRS-2 (Worldwide Reference System) с номерами (Path/Row) 177/025, 177/024, 176/025. Снимки также были пересчитаны в безразмерные коэффициенты спектральной яркости (КСЯ), принимающие значения от 0 до 1.

Использование снимков Landsat OLI 2021 года обусловлено тем, что на август 2022 года безоблачных снимков Landsat-8 на территорию исследования подобрать не удалось.

На следующем этапе для каждого объекта методом зональной статистики рассчитаны значения спектрально-отражательных характеристик по данным Sentinel-2 в 9 спектральных диапазонах (синий, зеленый, красный, 3 крайних красных, ближний и 2 коротковолновых инфракрасных). После этого для постагрогенных земель рассчитали спектрально-отражательные характеристики по данным Landsat-8 OLI – в 6 диапазонах, соответствующих основным каналам. Непосредственное сравнение отражательных свойств постагрогенных земель по данным с обоих типов снимков проводилось в их наиболее идентичных каналах: синем, зеленом, красном, ближнем и коротковолновых инфракрасных.

На основном этапе осуществлен анализ кривых спектральной яркости каждого типа постагрогенных земель по данным Sentinel-2 MSI и Landsat-8 OLI, выполнено сравнение статистических параметров спектрально-отражательных характеристик всех типов земель, определено наличие или отсутствие статистически значимых различий между ними. После этого изучены закономерности вариации спектрально-отражательных характеристик в ряду: «постагрогенные земли без древесной растительности – с единичной разреженной лесной растительностью – с частыми одиночными деревьями – с участками сплошного лесного покрова».

Результаты исследования

Процесс распространения лесной растительности на постагрогенных землях уверенно проявляется на снимках Sentinel-2, синтезированных в каналах наиболее высокого пространственного разрешения (10 м), при условии формирования сплошных участков древесной растительности (рис. 1).

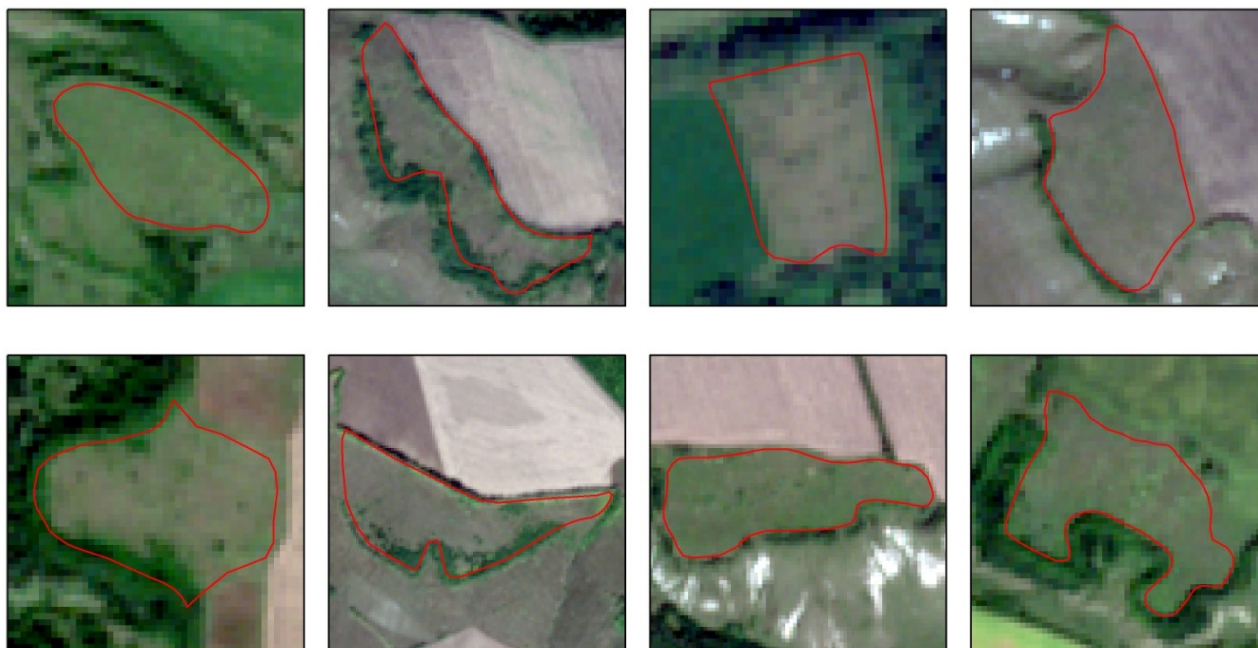


Рис. 1. Примеры постагрогенных земель юга Среднерусской возвышенности на многозональных снимках Sentinel-2 августа (синтез каналов 4 – 3 – 2)

Появление одиночных деревьев или их разреженных групп на снимках Sentinel-2 MSI и Landsat-8 OLI при визуальном анализе заметно очень слабо или может быть практически не заметно вследствие отсутствия выраженных дешифровочных признаков и ограничений пространственного разрешения. В самых детальных каналах Sentinel-2 оно составляет 10 м. Вместе с тем появление деревьев может изменять спектрально-отражательные характеристики постагрогенных земель и определяться при количественном анализе значений отражательной способности. Показателем соответствующего влияния выступает наличие различий в графиках спектральной отражательной способности, построенных для разных типов постагрогенных земель. Другим показателем влияния форм присутствия лесной растительности на отражательные характеристики постагрогенных земель выступает наличие статистически значимых различий по КСЯ между ними. При этом такие различия должны наблюдаться при одновременном наличии закономерного изменения коэффициентов спектральной яркости в зависимости от особенностей распространения древесной растительности (отсутствие деревьев, редкие единичные деревья и т.д.).

По кривым спектральной яркости, рассчитанным по данным Sentinel-2 для постагрогенных земель, выраженные отличия от остальных типов наблюдаются только для постагрогенных земель с участками сплошного лесного покрова (рис. 2). Они видны при сопоставлении абсолютных значений коэффициентов спектральной яркости, показанных на вертикальных осях графиков.

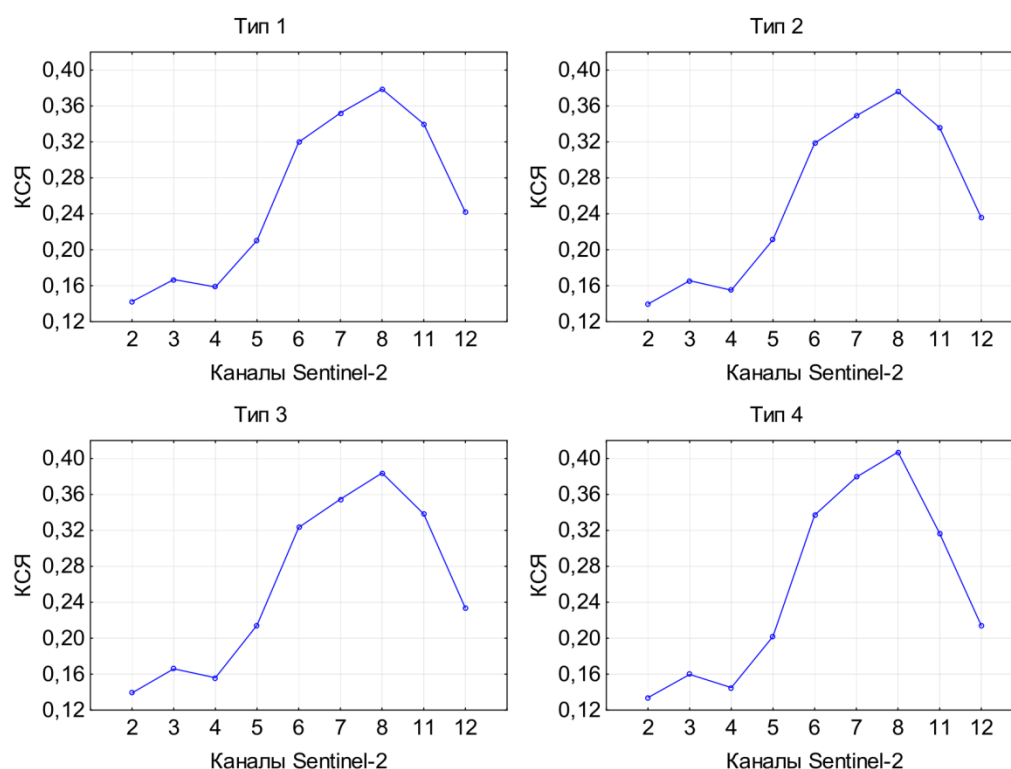


Рис. 2. Кривые спектральной отражательной способности, измеренной по данным Sentinel-2, различных типов постагрогенных земель юга Среднерусской возвышенности по присутствию древесной растительности. 1 – без древесной растительности; 2 – с редкими одиночными деревьями; 3 – с частыми одиночными деревьями; 4 – с наличием участков сплошного лесного покрова

Особенности графиков в видимой области спектра (каналы 2-4) во всех случаях примерно аналогичны, но в более длинноволновых диапазонах (каналы 8, 11, 12) разная форма распространения древесной растительности обуславливает изменения и в значениях коэффициентов спектральной яркости.

Для спектрально-отражательных характеристик, измеренных по данным Sentinel-2 MSI, в основных каналах, охватывающих видимую и инфракрасную области, исходя из графического анализа (рис. 3), наблюдается последовательное или близкое к нему изменение абсолютных значений КСЯ в ряду постагрогенных земель, отличающихся формой присутствия древесной растительности.

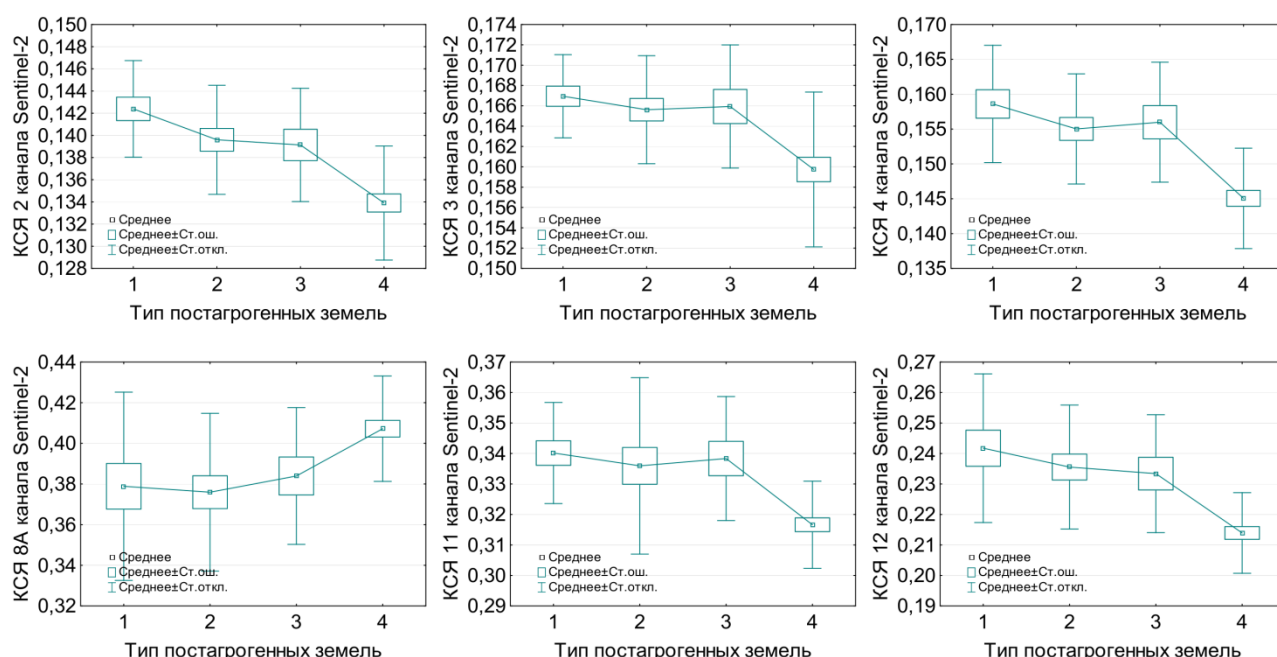


Рис. 3. Параметры спектрально-отражательных характеристик (коэффициентов спектральной яркости), измеренных по данным Sentinel-2, для типов постагрогенных земель с разной формой присутствия древесной растительности. 1 – без древесной растительности; 2 – с редкими одиночными деревьями; 3 – с частыми одиночными деревьями; 4 – с наличием участков сплошного лесного покрова

При этом статистически значимые различия на уровне менее 0,05 по спектрально-отражательным характеристикам от остальных типов постагрогенных земель характерны только для постагрогенных земель с участками сплошного лесного покрова (4 тип). Такие различия установлены во всех диапазонах видимого и инфракрасного спектра (табл. 1-2), за исключением середины крайней красной области.

Таблица 1. Статистическая значимость различий спектрально-отражательных характеристик красного диапазона, измеренных для типов постагрогенных земель по спутниковым данным Sentinel-2

Тип	1	2	3	4
1	—	0,155	0,365	0,000
2	0,155	—	0,722	0,000
3	0,365	0,722	—	0,000
4	0,000	0,000	0,000	—

Таблица 2. Статистическая значимость различий спектрально-отражательных характеристик коротковолнового инфракрасного диапазона, измеренных для типов постагрогенных земель по спутниковым данным Sentinel-2

Тип	1	2	3	4
1	–	0,513	0,807	0,000
2	0,513	–	0,731	0,000
3	0,807	0,731	–	0,001
4	0,000	0,000	0,001	–

Из таблиц 1-2 видно, что только для 4-го типа постагрогенных земель уровень статистической значимости отличий меньше порогового значения (0,05).

В остальных диапазонах таких различий не наблюдается, что выступает показателем отсутствия влияния наличия одиночных деревьев на спектрально-отражательные характеристики постагрогенных земель.

По кривым спектральной яркости, рассчитанным по данным Landsat OLI, 4-й тип постагрогенных земель также отличается от остальных. Вместе с тем, определенные различия от 1-го и 4-го типа характерны для угодий с разреженной или частой древесной растительностью (Тип 2-3) (рис. 4).

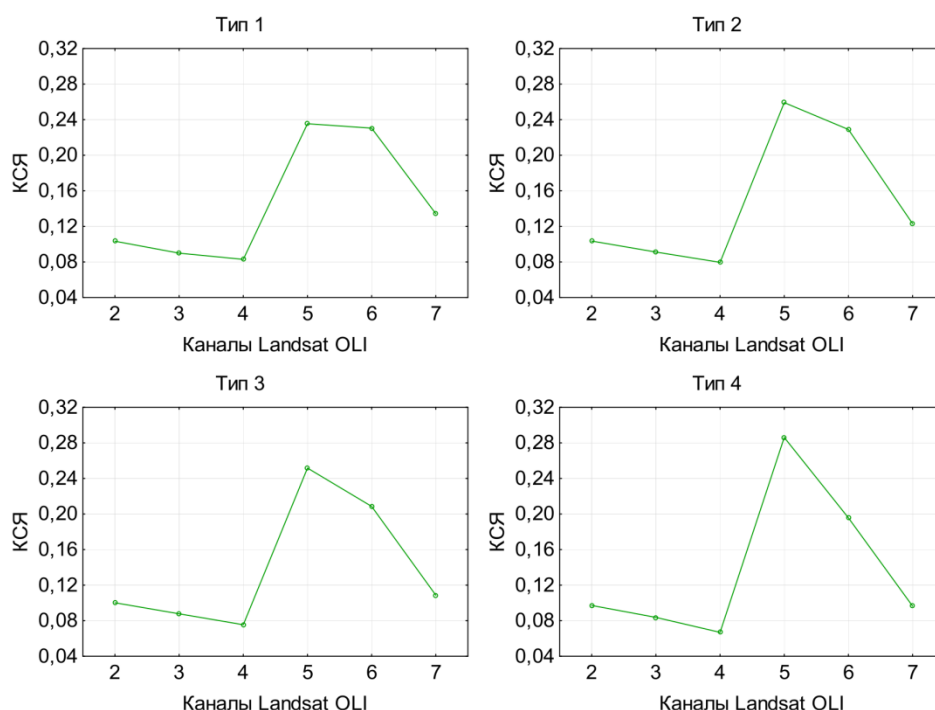


Рис. 4. Кривые спектральной отражательной способности, измеренной по данным Landsat OLI, различных типов постагрогенных земель юга Среднерусской возвышенности по присутствию древесной растительности. 1 – без древесной растительности; 2 – с редкими одиночными деревьями; 3 – с частыми одиночными деревьями; 4 – с наличием участков сплошного лесного покрова

Вследствие меньшего числа каналов в снимках Landsat OLI по сравнению с Sentinel-2 MSI, спектральные кривые постагрогенных земель несколько менее подробны, но на них также хорошо видны отличия их типов в ближней и коротковолновой инфракрасной областях. Они охватывают каналы 5-7.

Более наглядно особенности спектрально-отражательных характеристик, измеренных по данным Landsat OLI, для разных типов постагрогенных земель проявляются при графическом сопоставлении параметров каждого из них (рис. 5).

В целом стоит отметить общие особенности спектрально-отражательных характеристик, полученных по данным Landsat-8 OLI и Sentinel-2 MSI, проявляющиеся при графическом анализе. В обоих случаях изменение формы распространения лесной растительности на постагрогенных землях обуславливает сопутствующее снижение спектрально-отражательных характеристик в видимой и коротковолновой инфракрасной областях и их повышение в ближнем инфракрасном диапазоне (8-й канал Sentinel-2 и 5-й канал Landsat-8 OLI).

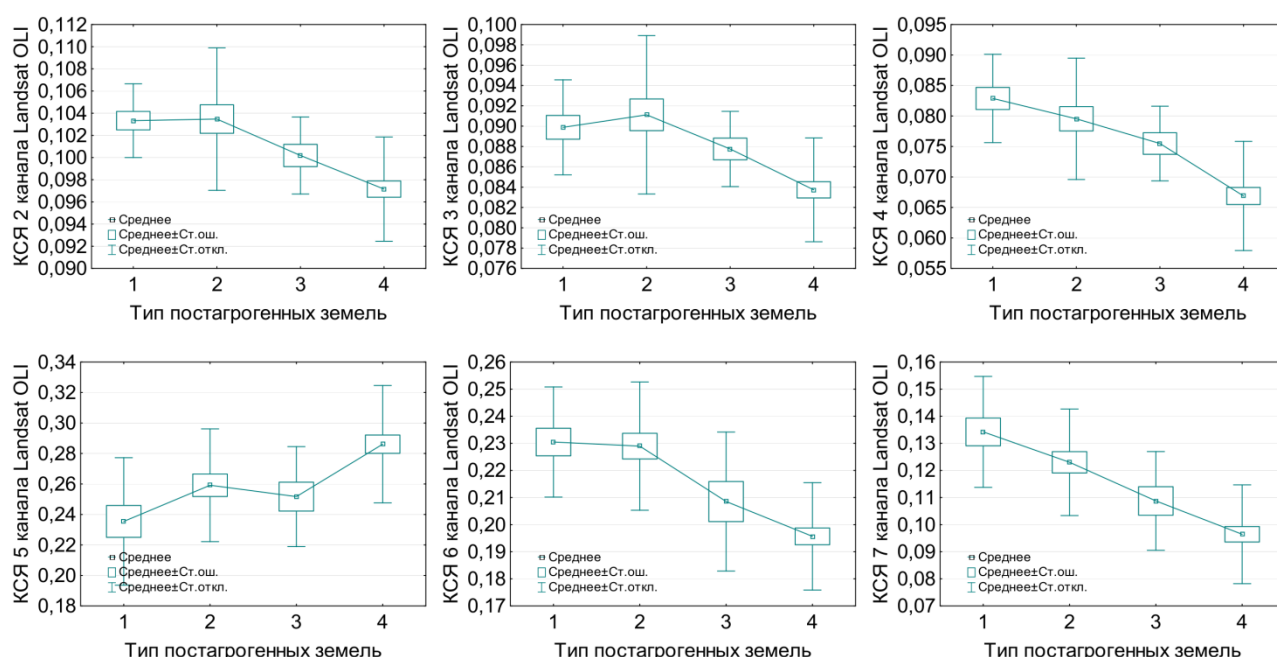


Рис. 5. Параметры спектрально-отражательных характеристик, измеренных по данным Landsat-8 OLI, для типов постагрогенных земель с разной формой присутствия древесной растительности 1 – без древесной растительности; 2 – с редкими одиночными деревьями; 3 – с частыми одиночными деревьями; 4 – с наличием участков сплошного лесного покрова

По спектрально-отражательным характеристикам видимого диапазона, измеренным на основе Landsat-8 OLI, статистически значимые отличия от остальных типов постагрогенных земель, также как и по данным Sentinel-2, свойственны только 4-му типу – с участками сплошного лесного покрова (табл. 3).

Таблица 3. Статистическая значимость различий спектрально-отражательных характеристик красного диапазона, измеренных для типов постагрогенных земель по спутниковым данным Landsat-8 OLI

Тип	1	2	3	4
1		0,505	0,335	0,000
2	0,505		0,100	0,000
3	0,335	0,100		0,036
4	0,000	0,000	0,036	

Только для этого типа постагрогенных земель средние значения коэффициентов спектральной яркости отличаются от остальных типов на уровне меньше 0,05.

Для спектрально-отражательных характеристик коротковолнового инфракрасного диапазона одновременных различий между всеми типами постагрогенных земель не наблюдается, но они присутствуют для некоторых из них (табл. 4).

Таблица 4. Статистическая значимость различий спектрально-отражательных характеристик коротковолнового инфракрасного диапазона, измеренных для типов постагрогенных земель, по спутниковым данным Landsat-8 OLI

Тип	1	2	3	4
1		0,829	0,010	0,000
2	0,829		0,009	0,000
3	0,010	0,009		0,075
4	0,000	0,000	0,075	

С другой стороны, необходимо отметить, что на основе анализа спектрально-отражательных характеристик постагрогенных земель, измеренных как по данным Sentinel-2 MSI, так и Landsat-8 OLI, устойчивого влияния форм присутствия лесной растительности в виде одиночных деревьев на отражательные характеристики угодий не установлено.

Вместе с тем разные формы присутствия лесной растительности на постагрогенных землях формируют различия в вариации их спектрально-отражательных характеристик. Тенденция к ее уменьшению в ряду типов постагрогенных земель 1-4 выявлена в спектрально-отражательных характеристиках ближнего и второго коротковолнового инфракрасного диапазона по данным Sentinel-2 (табл. 5). В остальных диапазонах влияния форм присутствия лесной растительности на отражательные характеристики не установлено.

Таблица 5. Коэффициенты вариации (%) спектрально-отражательных характеристик различных типов постагрогенных земель по Sentinel-2 MSI

Тип постагрогенных земель	Спектральные диапазоны					
	Синий	Зеленый	Красный	NIR	SWIR1	SWIR2
1	3,1	2,5	5,3	12,2	4,9	10,1
2	3,5	3,2	5,1	10,3	8,6	8,6
3	3,7	3,7	5,5	8,8	6,0	8,3
4	3,8	4,8	5,0	6,4	4,5	6,2

В спектрально-отражательных характеристиках, измеренных по данным Landsat OLI, аналогичные закономерности изменения вариации в изученном ряду постагрогенных земель установлены для ближнего инфракрасного диапазона (Табл. 6).

Таблица 6. Коэффициенты вариации (%) спектрально-отражательных характеристик различных типов постагрогенных земель по Landsat-8 OLI

Тип постагрогенных земель	Спектральные диапазоны					
	Синий	Зеленый	Красный	NIR	SWIR1	SWIR2
1	3,2	5,2	8,7	17,8	8,8	15,3
2	6,2	8,6	12,5	14,3	10,3	16,0
3	3,5	4,2	8,1	13,0	12,3	16,8
4	4,8	6,1	13,4	13,4	10,1	18,9

В этом диапазоне наблюдается общая тенденция снижения вариации спектрально-отражательных свойств постагрогенных земель в ряду «постагрогенные земли без древесной растительности – с единичной разреженной лесной растительностью – с частыми одиночными деревьями – с участками сплошного лесного покрова». По данным Landsat OLI также выявлено снижение вариации спектрально-отражательных свойств в диапазонах синего и красного каналов, не наблюдающееся по данным Sentinel-2 MSI.

Таким образом, общая закономерность спектрально-отражательных характеристик постагрогенных земель, изученных по данным Landsat-8 OLI и Sentinel-2 MSI, заключается в уменьшении вариабельности коэффициентов спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне. В остальных диапазонах устойчивого изменения вариации спектрально-отражательных характеристик в ряду «постагрогенные земли без древесной растительности – с единичной разреженной лесной растительностью – с частыми одиночными деревьями – с участками сплошного лесного покрова» не установлено.

Выводы

Проведен сопоставительный анализ влияния форм присутствия или распространения древесной растительности на постагрогенных землях юга Среднерусской возвышенности на их спектрально-отражательные характеристики, измеренные по данным Sentinel-2 MSI и Landsat-8 OLI. В ряду постагрогенных земель «с отсутствием лесной растительности, с редкими одиночными деревьями, с частыми отдельно стоящими деревьями, с участками сплошного лесного покрова» по данным с обоих типов изображений установлены общие закономерности изменения спектрально-отражательных характеристик видимого и инфракрасного диапазонов. При этом статистически значимые изменения в отражательных характеристиках, измеренных по данным Sentinel-2, начинают проявляться только после появления на постагрогенных землях участков сплошного лесного покрова. По данным Landsat-8 OLI аналогичная особенность наблюдается в наиболее длинноволновой части видимого и в ближнем инфракрасном диапазоне. В нем же выявлена общая закономерность снижения вариации спектрально-отражательных характеристик вследствие увеличения присутствия лесной растительности на постагрогенных землях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания №FZWG-2023-0011.

Библиографический список

1. Бурлуцкий В.А., Мазуров В.Н., Семешкина П.С., Косолапов В.П. Продукционный потенциал и освоение растительных сообществ залежных земель Мещовского ополья в Калужской области // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2021. № 1. С. 45-52. DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/45-52
2. Голеев П.В., Лисецкий Ф.Н. Воспроизводство почв в антропогенных ландшафтах лесостепи. М.: ГЕОС, 2009. 210 с.
3. Данилов Д.А., Яковлев А.А., Крылов И.А. Формирование естественных растительных ассоциаций на постагрогенных землях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. № 242. С. 60-82. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.60-82

4. Иванов А.И., Иванова Ж.А., Соколов И.В. Вторичное освоение неиспользуемых угодий // Российская сельскохозяйственная наука. 2020. № 2. С.48-52.
5. Королева Н.В., Тихонова Е.В., Ершов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В. Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке «Смоленское Поозерье» за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83-96. DOI: 10.7868/S0024114818020018
6. Кудрявцев А.Ю. Восстановительная динамика растительности лесостепного комплекса Среднего Поволжья // Экология. 2007. № 5. С. 323-330.
7. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А. Использование космических снимков ALOS для выявления площадей бывших сельскохозяйственных угодий, зарастающих лесом // Геоматика. 2010. № 4. С. 68-72.
8. Лежнин С.А. Оценка зарастания залежей Яранского района Кировской области по спутниковым данным // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2020. Т. 6. С. 160-171.
9. Терехин Э.А. Пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем Среднерусской лесостепи с применением спектрально-отражательных признаков // Исследование Земли из космоса. 2021. № 4. С. 84-96. DOI: 10.31857/S0205961421040060
10. Терехин Э.А., Чендев Ю.Г. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 3. С. 114-126. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-114-126
11. Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П. Сохранение и оптимизация агроландшафтов Центрального Черноземья // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 1. С.103-109. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109
12. Широких П.С., Федоров Н.И., Туктамышев И.Р., Бикбаев И.Г., Мартыненко В.Г. Закономерности лесовосстановительных сукцессий на заброшенных сельскохозяйственных землях Башкирского Предуралья // Экология. 2023. № 3. С.179-187. DOI: 10.31857/S036705972303006X
13. Bowen M.E., McAlpine C.A., House A.P.N., Smith G.C. Regrowth forests on abandoned agricultural land: A review of their habitat values for recovering forest fauna // Biological Conservation. 2007. Vol. 140. P. 273-296. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.016
14. Castaldi F., Halil Koparan M., Wetterlind J., Žydelis R., Vinci I., Özge Savaş A., Kıvrak C., Tunçay T., Volungevičius J., Obber S., Ragazzi F., Malo D., Vaudour E. Assessing the capability of Sentinel-2 time-series to estimate soil organic carbon and clay content at local scale in croplands // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. Vol. 199. P. 40-60. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.016
15. Dong T., Liu J., Qian B., He L., Liu J., Wang R., Jing Q., Champagne C., McNairn H., Powers J., Shi Y., Chen J.M., Shang J. Estimating crop biomass using leaf area index derived from Landsat 8 and Sentinel-2 data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 168. P. 236-250. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.003
16. Fayet C.M.J., Reilly K.H., Van Ham C., Verburg P.H. What is the future of abandoned agricultural lands? A systematic review of alternative trajectories in Europe // Land Use Policy. 2022. Vol. 112. Art. No. 105833. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105833
17. Nordén B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G. Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 489. Art. No. 119045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>
18. Tran K.H., Zhang H.K., McMaine J.T., Zhang X., Luo D. 10 m crop type mapping using Sentinel-2 reflectance and 30 m cropland data layer product // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022 Vol. 107. Art. No. 102692. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102692
19. Yin H., Prishchepov A.V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V.C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol. 210. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.050
20. Yoon H., Kim S. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 166. P. 201-212. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021

References

1. Burlutskii V.A., Mazurov V.N., Semeshkina P.S., Kosolapov V.P. Produktivnyy potentsial i osvoenie rastitel'nykh soobshchestv zaleznykh zemel' Meshchovskogo opol'ya v Kaluzhskoi oblast (Production capabilities and exploitation of fallow lands plant communities of Meshchovsky opolye in the Kaluga region). *Vestnik rossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi nauki*. 2021. No. 1. P. 45-52. DOI: 10.30850/vrsn/2021/1/45-52
2. Goleusov P.V., Lisetskii F.N. Vosproizvodstvo pochv v antropogennykh landshaftakh lesostepi (Soil reproduction in anthropogenic landscapes of forest-steppe), Moscow: GEOS, 2009, 210 p.
3. Danilov D.A., Yakovlev A.A., Krylov I.A. Formirovaniye estestvennykh rastitel'nykh assotsiatsii na postagrogennykh zemlyakh (Formation of natural plant associations on post-agrogenic lands). *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*. 2023. No. 242. P. 60-82. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.242.60-82
4. Ivanov A.I., Ivanova Zh.A., Sokolov I.V. Vtorichnoe osvoenie neispol'zuemykh ugodii (Secondary Development of Unused Land). *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*. 2020. No. 2. P.48-52.
5. Koroleva N.V., Tikhonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavriluk E.A., Pugachevskii A.V. Otsenka masshtabov zarastaniya nelesnykh zemel' v natsional'nom parke «Smolenskoe Poozer'e» za 25 let po sputnikovym dannym Landsat (Twenty-five years of reforestation on nonforest lands in Smolenskoe Poozerye national park according to Landsat imagery assessment). *Lesovedenie*. 2018. No. 2. P. 83-96. DOI: 10.7868/S0024114818020018
6. Kudryavtsev A.Yu. Vosstanovitel'naya dinamika rastitel'nosti lesostepnogo kompleksa Srednego Povolzh'ya (Vegetation restoration dynamics in the forest-steppe system of the Middle Volga region). *Ekologiya*. 2007. No. 5. P. 323-330.
7. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A. Ispol'zovanie kosmicheskikh snimkov ALOS dlya vyyavleniya ploshchadei byvshikh sel'skokhozyaistvennykh ugodii, zarastayushchikh lesom (Use of ALOS satellite images to reveal former farmland areas being forested). *Geomatika*. 2010. No. 4. P. 68-72.
8. Lezhnin S.A. Otsenka zarastaniya zalezhei Yaranskogo raiona Kirovskoi oblasti po sputnikovym dannym (The use of satellite data in the assessment of reforestation on the abandoned agricultural lands in yaransk district of the Kirov region). *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*. 2020. Vol. 6. P. 160-171.
9. Terekhin E.A. Prostranstvenno-vremennaya otsenka lesistosti ovrazhno-balochnykh sistem Srednerusskoi lesostepi s primeneniem spektral'no-otrazhatel'nykh priznakov (Spatio-temporal assessment of forest cover of small-dry-valleys in the Central Russian forest-steppe using spectral response). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021. No. 4. P. 84-96. DOI: 10.31857/S020596142104006
10. Terekhin E.A., Chendev Yu.G. Otsenka izmeneniya lesistosti v sovremennyy period na yuge Srednerusskoi vozvyshennosti s ispol'zovaniem materialov raznovremennykh kosmicheskikh s"emok (Estimation of forest cover changes during modern period in the south of the Central Russian Upland using multiyear remote sensing data). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 3. P. 114-126. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-114-1260
11. Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. Sokhraneniye i optimizatsiya agrolandshaftov Tsentral'nogo Chernozem'ya (Preservation and optimization of agrolandscapes of the Central Chernozem zone). *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2017. No. 1. P.103-109. DOI: 10.15356/0373-2444-2017-1-103-109
12. Shirokikh P.S., Fedorov N.I., Tukhtamyshev I.R., Bikbaev I.G., Martynenko V.G. Zakonomernosti lesovosstanovitel'nykh suksessii na zabroshennykh sel'skokhozyaistvennykh zemlyakh Bashkirskogo Predural'ya (Patterns of Reforestation Successions on Abandoned Agricultural Lands of the Bashkir Cis-Urals), *Ekologiya*. 2023. No. 3. P.179-187. DOI: 10.31857/S036705972303006X
13. Bowen M.E., McAlpine C.A., House A.P.N., Smith G.C. Regrowth forests on abandoned agricultural land: A review of their habitat values for recovering forest fauna. *Biological Conservation*. 2007. Vol. 140. P. 273-296. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.016
14. Castaldi F., Halil Koparan M., Wetterlind J., Žydelis R., Vinci I., Özge Savaş A., Kıvrak C., Tunçay T., Volungevičius J., Obber S., Ragazzi F., Malo D., Vaudour E. Assessing the capability of Sentinel-2 time-series to estimate soil organic carbon and clay content at local scale in croplands. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. Vol. 199. P. 40-60. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.03.016

15. Dong T., Liu J., Qian B., He L., Liu J., Wang R., Jing Q., Champagne C., McNairn H., Powers J., Shi Y., Chen J.M., Shang J. Estimating crop biomass using leaf area index derived from Landsat 8 and Sentinel-2 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 168. P. 236-250. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.08.003
16. Fayet C.M.J., Reilly K.H., Van Ham C., Verburg P.H. What is the future of abandoned agricultural lands? A systematic review of alternative trajectories in Europe. *Land Use Policy*. 2022. Vol. 112. Art. No. 105833. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105833
17. Nordén B., Olsen S.L., Haug S., Rusch G. Recent forest on abandoned agricultural land in the boreonemoral zone – Biodiversity of plants and fungi in relation to historical and present tree cover. *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 489. Art. No. 119045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119045>
18. Tran K.H., Zhang H.K., McMaine J.T., Zhang X., Luo D. 10 m crop type mapping using Sentinel-2 reflectance and 30 m cropland data layer product. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022 Vol. 107. Art. No. 102692. DOI: 10.1016/j.jag.2022.102692
19. Yin H., Prishchepov A.V., Kuemmerle T., Bleyhl B., Buchner J., Radeloff V.C. Mapping agricultural land abandonment from spatial and temporal segmentation of Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 210. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.050
20. Yoon H., Kim S. Detecting abandoned farmland using harmonic analysis and machine learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 166. P. 201-212. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.05.021